

Efecto del aditivo pentomuls 3c en la composición de los gases de combustión del petróleo crudo cubano

Effect of pentomuls 3c additive on the composition of cuban crude oil combustion gase

Yosvany González Díaz ^{1,*}, Isnel Benítez Cortés², Francisco García Reina³, Greta Márquez Peñamaría⁴, Luis Fernando Prieto Montenegro⁵, Jorge Carracedo Fernández⁶, Dayron Bárbaro Aldama Barbachán⁷, Pablo Ángel Galindo Llanes⁸

¹Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz / Camagüey / Cuba; yosvany.gonzalez@reduc.edu.cu, <https://orcid.org/0000-0002-9735-9137>

²isnel.benites@reduc.edu.cu. <https://orcid.org/0000-0003-2427-640X>

³ pancho@unica.cu. <https://orcid.org/0000-0001-5721-3363>

⁴ greta.marquez@reduc.edu.cu. <https://orcid.org/0000-0001-7678-7274>

⁵ fernando.prieto@pentol.net. <https://orcid.org/0000-0002-6985-6531>

⁶ jorge.carracedo@pentol.net. <https://orcid.org/0009-0003-6407-4260>

⁷ dairon@ctenue.une.cu. <https://orcid.org/0009-0009-2819-8702>

⁸ pablo.galindo@reduc.edu.cu. <https://orcid.org/0000-0003-1738-8761>

* Correspondencia: yosvany.gonzalez@reduc.edu.cu; Tel.: (+53) 58160023

DOI: 10.70373/RB/2024.09.04.3

Resumen

En centrales termoeléctricas es común que el petróleo se emulsione para disminuir las emisiones de gases. Es necesario evaluar su efecto en la generación de estos gases para determinar la emulsión óptima, que es el objetivo de este trabajo. Se diseñaron varias emulsiones en línea con diferentes porcentajes de agua y varias concentraciones de aditivo PentoMuls 3C, alrededor de la emulsión recomendada por el fabricante. La composición de los gases se midió utilizando un analizador de gases Testo 340. Los resultados indican que la concentración más baja de NO fue de 88,33 ppm cuando se utilizó una emulsión con un 5 % de agua y $0,25 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ de aditivo en el calentador de aire regenerativo (CAR) B. Esta cifra es inferior a los 137 ppm observados cuando se usó crudo solo y a los 500 ppm estipulados por la NC 803:2017. En relación al dióxido de carbono, se obtuvo un

15,91 % para la emulsión con 5 % de agua y $0,15 \times 10^{-7}$ m³/kg de aditivo en el CAR B. Respecto al monóxido de carbono, se alcanzaron 159,50 ppm con un 6 % de agua y $0,2 \times 10^{-7}$ m³/kg de aditivo en el CAR A, mostrando mejores resultados que el petróleo crudo (313 ppm).

Palabras clave: gases de la combustión; emulsión; aditivos; contaminación atmosférica.

Abstract

In thermal power plants, emulsifying oil is a common practice to reduce gas emissions. This study aims to evaluate the impact of emulsification on the generation of these gases and to identify the optimal emulsion. Some emulsions were formulated with different water percentages and concentrations of the additive PentoMuls 3C, adhering to the recommendations provided by the manufacturer. Gas composition was measured using a Testo 340 gas analyzer. The results showed that the lowest concentration of nitrogen oxide (NO) recorded was 88,33 ppm when using an emulsion containing 5% water and 0.25×10^{-7} m³/kg of additive in regenerative air heater (RAH) B. This value is significantly lower than the 137 ppm observed with crude oil alone and well below the 500 ppm limit set by NC 803:2017. For carbon dioxide, the emulsion with 5% water and $0,15 \times 10^{-7}$ m³/kg of additive in RAH B resulted in a concentration of 15,91 %. In terms of carbon monoxide, levels reached 159,50 ppm with an emulsion containing 6% water and $0,2 \times 10^{-7}$ m³/kg of additive in RAH A, demonstrating improved performance compared to crude oil, which measured 313 ppm.

Keywords: combustion gases; emulsion; additives; atmospheric pollution.

Introducción

La contaminación atmosférica es reconocida desde los tiempos de Hipócrates como un problema que afecta a la salud del hombre y que ha tenido un marcado incremento a partir del desarrollo industrial.

⁽¹⁾ Actualmente, se emplea el término catástrofe para caracterizar el cambio climático, el cual afecta a todo el planeta, con grandes potencialidades de afectar la vida humana. ⁽²⁾

Es precisamente el sector industrial el que ha causado la mayor cantidad de problemas medioambientales, ya que puede degradar la calidad del suelo, contaminar las fuentes de agua potable y emitir contaminantes al medio ambiente. ⁽³⁾ Desde el punto de vista medioambiental, uno de los retos mayores en el uso de combustibles fósiles es el manejo de los gases producidos durante la combustión debido a su naturaleza tóxica, destacándose el dióxido de carbono (CO₂), principal causante del cambio climático, ⁽⁴⁾ siendo el objetivo de emisión “0” todavía un reto en la actualidad.

⁽⁵⁾ La contaminación del aire debido al uso indiscriminado de estos combustibles constituye uno de

los problemas más críticos por lo que se debe trabajar en el conocimiento del impacto ambiental que producen los contaminantes, su prevención y control. ⁽⁶⁾

Como consecuencia de su uso, las emisiones de gases de efecto invernadero se han incrementado. En 2023, el promedio mundial de la concentración en superficie de CO₂ alcanzó 420,0 ppm, el metano (CH₄) 1 934 ppm y el óxido nitroso (N₂O) 336,9 ppm, ⁽⁷⁾ teniendo un impacto directo en la composición de la atmósfera a nivel mundial. ⁽²⁾ Según la Unión Europea, el desarrollo de los tratados relacionados con la calidad del aire aplicados han permitido combatir el cambio climático, el incremento de la pérdida de biodiversidad, ⁽⁸⁾ señalando que la velocidad en que se presenta este fenómeno ha ido incremento en los últimos años. ⁽⁹⁾

Para mitigar su impacto sobre la atmósfera y el clima, se presentan las tecnologías de almacenamiento de energía y las de captura del CO₂ ⁽¹⁰⁾ aunque estas están, aún, muy distantes de dar solución a la situación actual. ⁽⁵⁾ Se han realizado estudios para evaluar el efecto del cambio climático, producido fundamentalmente por las emisiones de CO₂, que tratan sobre la disponibilidad de vientos, reconociéndose que los patrones de viento varían según varían según los contextos geográficos, enfoques de modelización y proyecciones climáticas. ⁽¹¹⁾

Aunque existen reportadas tecnologías para la reducir de las emisiones de estos gases de combustión, ⁽¹²⁻¹⁴⁾ no se examina el control de múltiples contaminantes de forma combinada utilizando las últimas tecnologías. ⁽¹⁵⁾ Uno de los métodos más innovadores es la co-combustión, que implica la utilización de carbón mezclado con biomasa. Un ejemplo visible de esto es el uso de aserrín de madera, que permite observar la reducción de los impactos de CO₂, el aumento en la utilización de fuentes renovables de energía y la evaluación de los impactos ambientales mediante el Análisis del Ciclo de Vida. ⁽¹⁶⁾

En Cuba, a pesar de los esfuerzos intensivos para modificar la matriz energética con el fin de reducir el consumo de combustibles fósiles y sustituirlos por fuentes renovables antes de 2030, ⁽¹⁷⁾ meta alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ⁽¹⁷⁾ la generación base de energía eléctrica sigue dependiendo de combustibles fósiles. El uso de petróleo crudo pesado en la generación de energía ha resultado en un incremento de las emisiones de partículas y gases provenientes de la combustión, en particular óxido de nitrógeno (NO), dióxido de azufre (SO₂) y monóxido de carbono (CO). Esto también ha dado lugar a problemas operacionales en las fases de precombustión, combustión y postcombustión. ⁽¹⁸⁾ Para mitigar estos problemas, se recomienda la utilización de aditivos que mejoren la combustión, lo que repercutirá positivamente en el rendimiento del generador de vapor y

en el análisis de las emisiones puntuales, permitiendo estimar los valores reales según el tipo de combustible utilizado.

Estos aditivos cumplen diferentes funciones: catalizadores, para mejorar la combustión reduciendo las emisiones de gases, oxigenados para incrementar la composición de oxígeno en la mezcla precombustión, antioxidantes, mejoradores del índice de cetano, ⁽¹⁹⁾ así como, tensoactivos para mejorar la viscosidad, ⁽²⁰⁾ dispersantes de asfaltenos, ⁽²¹⁾ inhibidores de la corrosión, ⁽²²⁾ entre otras.

Es fundamental, en primer lugar, determinar el volumen y la composición química de los gases de combustión generados, especialmente el CO₂, que es el principal responsable del cambio climático. Esta información es crucial para evaluar con mayor precisión el impacto ambiental de estas emisiones. En Cuba, se utiliza el aditivo PentoMuls 3C, como emulgente, para formar una emulsión del tipo agua/petróleo, con el objetivo mejorar la combustión del petróleo crudo pesado en las centrales termoeléctricas. Sin embargo, hasta la fecha no se ha documentado su efecto en la composición de los gases, especialmente en la formación de CO₂, lo que impide realizar una evaluación integral de la dosificación necesaria. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es analizar el efecto de las mezclas de aditivo y agua en la generación de CO₂ y otros gases de combustión. Este análisis servirá como paso previo para la introducción de futuras tecnologías destinadas a reducir estas emisiones y para determinar la dosificación óptima de la mezcla de combustible, aditivo y agua.

Materiales y métodos

Diseño de experimentos

Para el estudio se parte de la emulsión establecida por el fabricante, la cual está conformada por petróleo crudo cubano mejorado, el aditivo emulgente PentoMuls 3C, con una concentración de $2,5 \times 10^{-7}$ m³/kg de combustible y 6 % de agua. Se diseña un experimento donde se escogen varios valores por encima y por debajo para la concentración de aditivo y el porcentaje de agua, con el objetivo de evaluar el comportamiento de los gases alrededor del nivel prefijado. Para el agua se trabaja con 4 %, 5 %, 6 % y 7 % y para el aditivo se trabaja con $1,5 \times 10^{-7}$ m³/kg, 2×10^{-7} m³/kg, $2,5 \times 10^{-7}$ m³/kg, 3×10^{-7} m³/kg y $3,5 \times 10^{-7}$ m³/kg. Para la preparación de estas emulsiones, se cuenta con una planta de emulsión en línea que posee un sistema de control automático que garantiza una relación constante entre los valores del flujo de combustible, el flujo de aditivo y el flujo de agua.

Una vez ajustados los niveles de aditivo y agua según el diseño experimental, se espera un tiempo prudencial para garantizar que el combustible emulsionado, recorra el sistema de tuberías desde la planta de emulsión hasta los quemadores, se someta al proceso de combustión y recorra todo el generador de vapor, pasando por la zona radiante, el eje convectivo y llegue a la zona de los CAR.

Este equipo es el último que se encuentra en el recorrido de los gases de combustión antes de salir por la chimenea. Los CAR tienen la función de intercambiar el calor sensible cedido por los gases de combustión y el aire proveniente de la atmósfera el cual es enviado a los quemadores. Cuenta, además, con dos zonas, la A y la B, las cuales deben trabajar en las mismas condiciones. Sin embargo, debido a las infiltraciones que se presentan en este equipo, los valores de los parámetros de cada una de ellas, es común que sean diferentes. Por tanto, las mediciones de la composición de los gases en cada una de ellas son de gran importancia. Este tiempo se estima en unos 40 minutos.

Una vez estimada la llegada de los gases producto de la combustión de la emulsión seleccionada, se realizan las mediciones de la composición de los gases. Los CAR poseen un conducto en la parte superior que permite introducir la sonda de alta resistencia que acompaña el analizador de gases de la combustión TESTO 340 de resolución de 0,1 ppm para todas las mediciones de CO, CO₂ y NO_x. Se realizan tres mediciones en ambos lados espaciados cada 15 minutos y se determinan los valores mínimos, máximos, los promedios, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Cada unidad de generación cuenta con dos CAR independientes, el A y el B. Al salir los gases de combustión del economizador, llegan a estos equipos donde se separan los flujos de forma equitativa. De esta manera, se midió la composición de los gases en los dos equipos de forma independiente, CAR A y CAR B.

Resultados

Efecto de la emulsión PentoMuls 3C/agua en la composición química de los gases de combustión

- **Monóxido de nitrógeno**

Los niveles de NO para el CAR A se encuentran entre 117,0 ppm y 171,5 ppm, con un valor promedio de 154,15 ppm, una desviación estándar de 16,6022 y un coeficiente de variación del 10,7702 %. Para el CAR B los valores varían entre 88,33 ppm y 166,5 ppm, con una media de 140,522 ppm, una desviación estándar igual a 18,3648 y un coeficiente de variación del 13,069 %. Se aprecia que el NO no presentan grandes variabilidades mostrando que no existe influencia de los niveles de agua y aditivos estudiados.

Se requiere que el contenido de NO en los gases de combustión sea el menor posible. Los niveles de NO en el CAR A que están por encima a los niveles obtenidos con el combustible solo se presentan, para todas las combinaciones del 4 % de agua, 5 % de agua/0,2x10⁻⁷ m³/kg, 0,3x10⁻⁷ m³/kg y 0,35x10⁻⁷ m³/kg, 6 % de agua/0,15x10⁻⁷ m³/kg, 0,2x10⁻⁷ m³/kg, 0,3x10⁻⁷ m³/kg y 0,35x10⁻⁷ m³/kg y para 7 % de agua/0,2x10⁻⁷ m³/kg, 0,3x10⁻⁷ m³/kg y 0,35 x10⁻⁷ m³/kg. Para el CAR B se presentan valores mayores para las combinaciones del 4 % de agua/0,2x10⁻⁷ m³/kg, 0,25x10⁻⁷ m³/kg, 0,3x10⁻⁷ m³/kg y

0,35x10⁻⁷ m³/kg, 5 % de agua/0,2x10⁻⁷ m³/kg, 0,3x10⁻⁷ m³/kg y 0,35x10⁻⁷ m³/kg. Para 6 % de agua/0,15x10⁻⁷ m³/kg, 0,2x10⁻⁷ m³/kg, 0,3x10⁻⁷ m³/kg y 0,35x10⁻⁷ m³/kg y para 7 % de agua/0,2x10⁻⁷ m³/kg, 0,3x10⁻⁷ m³/kg y 0,35x10⁻⁷ m³/kg. Existe coincidencia entre ambos CAR para las combinaciones de 4 % de agua/0,2x10⁻⁷ m³/kg y 0,35x10⁻⁷ m³/kg, 5 % de agua/0,2x10⁻⁷ m³/kg, 0,3x10⁻⁷ m³/kg y 0,35x10⁻⁷ m³/kg, para 6 % de agua/0,15x10⁻⁷ m³/kg, 0,2x10⁻⁷ m³/kg, 0,3x10⁻⁷ m³/kg y 0,35x10⁻⁷ m³/kg y para 7 % de agua/0,2x10⁻⁷ m³/kg, 0,3x10⁻⁷ m³/kg y 0,35x10⁻⁷ m³/kg. La figura 1 muestra los resultados para el NO.

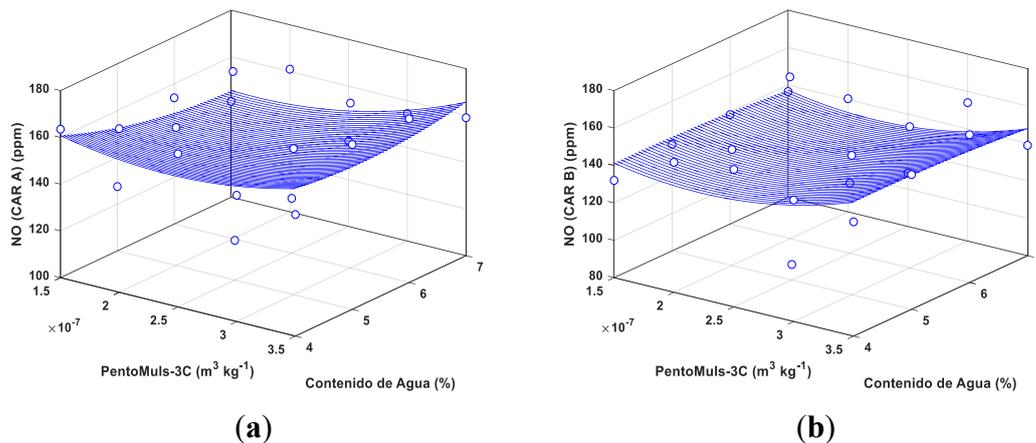


Figura 1. Monóxido de nitrógeno (a) CAR A: (b) CAR B

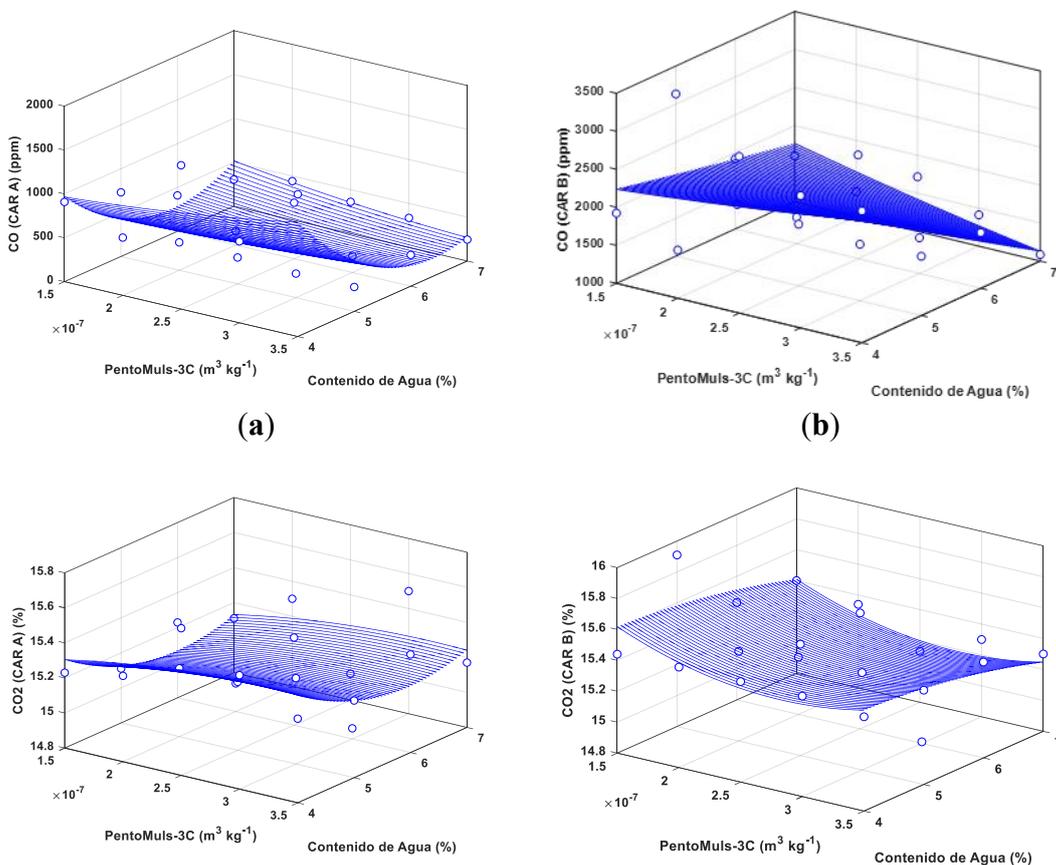
• **Dióxido de carbono y monóxido de carbono**

El CO₂ en el CAR A se mantuvo entre el 14,86 % y el 15,64 % con un valor promedio de 15,2325 % y desviación estándar de 0,1849. Estos valores dan como resultado un coeficiente de variación del 1,21385 %, indicando que no existe variabilidad en este parámetro. Para el CAR B los resultados indican una variación entre el 14,81 % y el 15,91 % para todos los niveles estudiados, mostrando un valor promedio de 15,385 % y una desviación estándar de 0,2054. Esto arroja un coeficiente de variación de 1,3353 %. De forma general, para ambos CAR los valores de CO₂ varían entre el 14,81 % y el 15,91 %, los que corresponden con el CAR B. (ver figura 2).

En este caso, se quiere que el contenido de CO₂ sea mayor, indicador de una buena combustión. En cada CAR existen valores que sobrepasan los niveles determinados para el combustible puro, lo que indica, entre muchos factores, que sería aconsejable trabajar con estos niveles de combinación agua/aditivo. Para el caso del CAR A, se obtienen mejores valores para las combinaciones 4 % de agua con 0,25x10⁻⁷ m³/kg y 0,3x10⁻⁷ m³/kg, 6 % de agua/0,35x10⁻⁷ m³/kg y 7 % de agua/0,3x10⁻⁷ m³/kg. En el CAR B se obtienen mejores resultados para las combinaciones 5 % de agua/0,15x10⁻⁷ m³/kg y 0,25x10⁻⁷ m³/kg y 6 % de agua/0,25x10⁻⁷ m³/kg. Entre ambos CAR no existe coincidencia de este parámetro.

En el caso del CO, su presencia en los gases indica que la combustión, durante todos los experimentos, fue incompleta. Los resultados muestran que, en todas las combinaciones evaluadas, existe presencia de este gas, por lo que se corrobora que el momento en que se realizaron los experimentos, no eran los mejores desde el punto de vista de la combustión y no se logró que fuera completa (ver figura 2). Los resultados revelan que en el CAR A, varía entre 159,5 ppm y 1638,5 ppm, con valor promedio de 554,583 ppm, desviación estándar igual a 429,726 y un coeficiente de variación del 77,4863 %. En el CAR B varían entre 1085,0 ppm y 3132,0 ppm, con media de 1920,24 %, desviación estándar de 583,145 con un coeficiente de variación del 30,3683 %. Estos resultados indican que, en el CAR A existen mayores variabilidades de estos valores que en el CAR B, lo cual puede ser significativo de niveles de infiltraciones superiores en este equipo.

En el CAR A, las combinaciones siguientes de agua/aditivo aportan niveles de CO por encima del emitido por el combustible puro. Estas son: 4 % de agua/todas las concentraciones de aditivo, 5 % de agua/ $0,15 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ y $0,2 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$, 6 % de agua/ $0,15 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$, $0,25 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ y $0,35 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ y para 7 % de agua/ $0,2 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$, $0,25 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ y $0,3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$. Por su parte, el CAR B presentan valores mayores de CO respecto al combustible puro para todas las combinaciones, por lo que coincide con las mismas del CAR A en los niveles obtenido en este.



(a)

(b)

Figura 2. CO y CO₂. (a) CAR A: (b) CAR B

- **Oxígeno y exceso de aire**

La figura 3 muestra los resultados del nivel de oxígeno y del exceso de aire. Los gráficos muestran que, en ambos CAR, se obtienen los menores niveles de oxígeno y exceso de aire para el valor máximo de PentoMuls 3C y mínimo de agua. Esto indica que se deben trabajar a estos niveles para la entrada al generador de vapor de un oxígeno en exceso que no participa en el proceso de combustión. Los valores de oxígeno en el CAR A varían entre 0,51 % y 1,37 %, con un valor promedio de 0,899 % y una desviación estándar de 0,22 %, para un coeficiente de variación del 25,5264 % lo cual indica una gran variación de los valores en el intervalo estudiado. Por su parte, para el CAR B, los resultados varían de 0,25 % a 1,32 % con un valor promedio de 0,5405 %, desviación estándar igual a 0,249071 y un coeficiente de variación del 46,0817 %. En este caso, la variabilidad en el porcentaje de oxígeno es mucho mayor en el CAR B que en el CAR A. Esto puede deberse a que existan mayores niveles de infiltraciones. De forma general, esta variable se mantiene en el intervalo de 0,25 -1,37 %.

El contenido de oxígeno tiene una relación directa con el exceso de aire, lo cual se corrobora en los gráficos. Para el CAR A este varían entre 1,02 % y 1,07 %, con un valor promedio de 1,0405 % y desviación estándar igual a 0,0131689. Estos resultados indican un coeficiente de variación de 1,26564 %, el cual resulta muy bajo, indicando que no existe una gran variabilidad de los datos respecto a su valor promedio. Para el CAR B, varían de 0,99 % a 1,06 % con valor promedio de 1,022 %, desviación estándar igual a 0,0143637 y un coeficiente de variación de 1,40545 %, obteniéndose resultados similares en cuanto a la variabilidad de esta variable.

Por otra parte, una comparación entre con el contenido de oxígeno del petróleo emulsionado con el petróleo crudo solo (O₂ CAR A=0,74 % y O₂ CAR B=0,44 %) permite identificar como a varias combinaciones de aditivo y agua se obtienen valores por encima y por debajo del obtenido con el petróleo crudo. En este caso, se obtienen valores mayores de oxígeno para todas las variantes de 7 % de agua y para todas las del 5 % de agua, excepto para 0,15x10⁻⁷ m³/kg. Resultados similares se obtienen para 4 % de agua/0,2x10⁻⁷ m³/kg y para 6 % de agua con 0,2x10⁻⁷m³/kg y 0,35x10⁻⁷ m³/kg. De forma general, en ambos CAR los valores varían entre 0,99 % y 1,07 %.

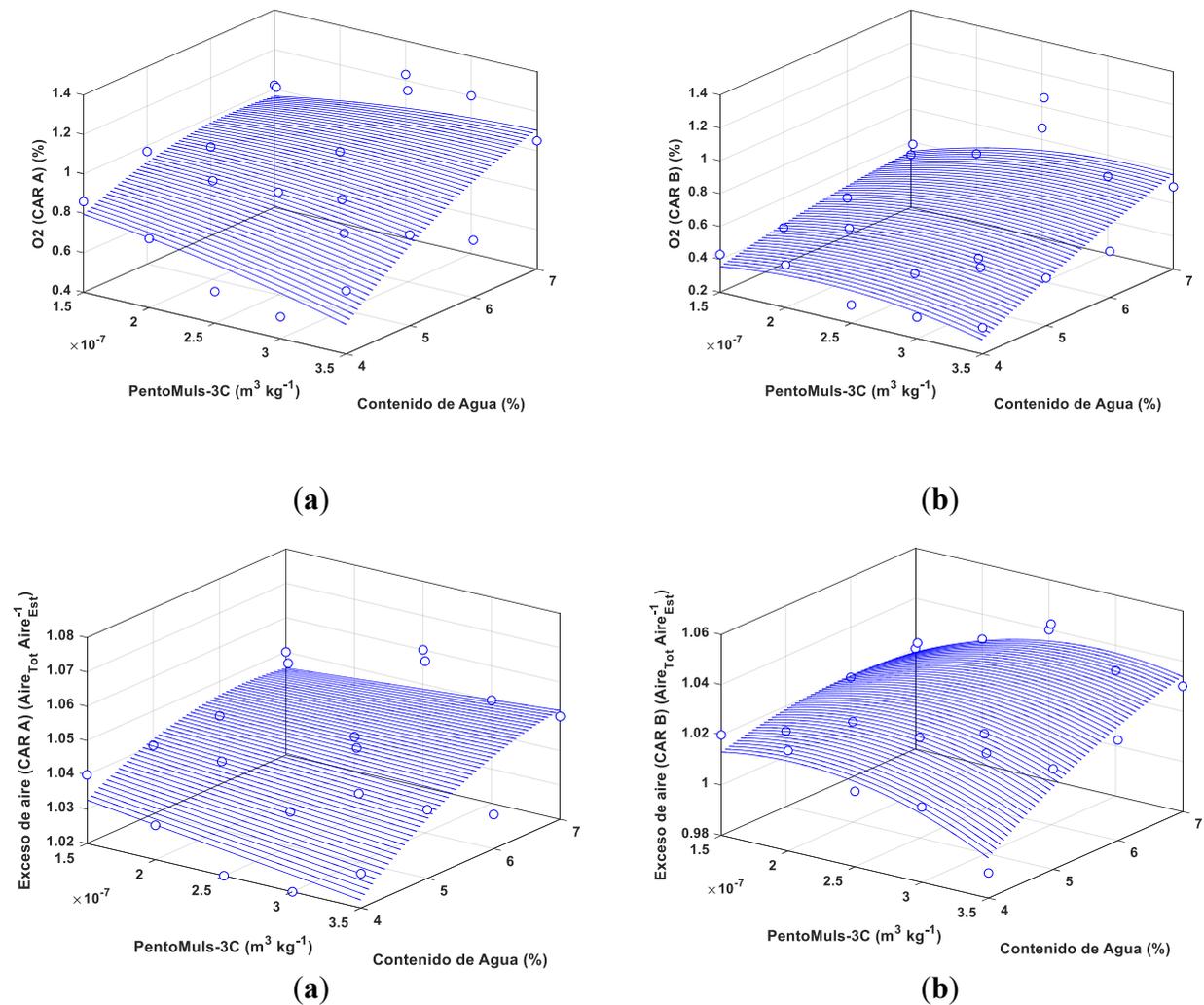


Figura 3. Oxígeno y exceso de aire. (a) CAR A: (b) CAR B

Discusión

El CO, reconocido como un gas contaminante del aire, que en raras ocasiones ha tenido un interés científico, es un parámetro a tener en cuenta en la evaluación sanitaria, ya que su presencia se asocia a intoxicaciones graves y mortales, cuando se encuentra en grandes concentraciones en ambientes cerrados. ⁽²³⁾ Cuando este es inhalado, reacciona con la hemoglobina formando carboxihemoglobina⁽²⁴⁾ y su presencia en bajas concentraciones puede causar isquemia miocárdica y arritmia cardíaca, mientras a altas concentraciones puede provocar asfixia o muerte. ⁽²⁵⁾ Para este gas, no existe reportada la norma cubana de emisión. Sin embargo, con una serie de datos tecnológicos se pueden estimar los resultados a partir de la aplicación de varios métodos como son el balance de masa, factores de emisión, cálculos ingenieriles y mediciones en la fuente emisora. ⁽²⁶⁻²⁹⁾ No obstante, los valores permisibles de emisión varían de 0 a 500 ppm según la potencia de los generadores de la fuente de emisión, de la legislación de cada país o la región. ^(7,8,29-31) Es preciso trabajar con cero emisiones de CO, lo que indica una combustión completa del combustible, evidencia mejoras en la

eficiencia de la combustión y reduce los costos de este proceso. ⁽³²⁾ En nuestro caso, el resultado de este parámetro para cuando se trabaja el petróleo crudo solo es de 313 ppm y el menor valor es 159,50 ppm cuando es emulsionado con un 6 % de agua y $0,2 \times 10^{-7}$ m³/kg de aditivo en el CAR A. Ambos resultados son satisfactorios teniendo en cuenta que se encuentran por debajo de 500 ppm. Tomando como base la concentración de CO cuando está puro, se evidencia que la emulsión se logra disminuir en un 50 % su nivel de emisión en esas condiciones. Por otra parte, si se tiene en cuenta que la concentración máxima admisible de este gas para 20 minutos de exposición según la norma cubana NC 1020: 2014 es de 39,29 ppm, ⁽³³⁾ entonces se puede afirmar que esta fuente fija de emisión contribuye al aumento de la concentración de este gas, lo que afecta al medio ambiente. Para el CO₂ tampoco existe la norma.

En la central lo que se regula es el oxígeno en el proceso de la combustión. El oxígeno en exceso que no participa en este proceso, se emite por la chimenea. Se debe tratar que este sea lo más bajo posible ya que se reduciría la formación de todos los óxidos de azufre y nitrógeno, así como la formación de cenizas en el interior de las zonas de transferencia de calor. Por otra parte, es un oxígeno que entra al generador de vapor sin aportar ningún valor calórico y, lo que sucede, es que absorbe calor de la quema del combustible, incrementando el volumen del mismo. De esta forma, se incrementarían los niveles de CO₂ y otros gases contaminantes. Se recomienda que sea lo menor 1 %, ⁽³⁴⁾ por lo que todos los valores para las diferentes combinaciones de aditivo/agua están por debajo de este nivel.

En el caso del NO, el porcentaje mayor de emisiones en diferentes países como China, Estados Unidos y el continente europeo, es atribuido a las plantas de generación de energía. ⁽³⁵⁾ Estas emisiones traen como consecuencia afectaciones en la actividad cognitiva. ⁽³⁶⁾ En espacios abiertos, desde fuentes fijas como es la chimenea de una central termoeléctrica, la NC 803 ⁽³⁷⁾ plantea un valor máximo de emisión de 500 ppm para fuentes ya existentes y de 400 ppm para fuentes nuevas, referidas a 3 % de oxígeno en gas seco. De esta forma, todos los valores de NO para las combinaciones estudiadas están dentro de la norma para futuras inversiones.

Es recomendable continuar el estudio de las emisiones a partir de los factores de emisión reportados por Meneses y colaboradores ⁽³⁸⁾ para las diferentes termoeléctricas cubanas. La determinación de los valores de los factores propios de emisión aplicando las diferentes metodologías que expone en su investigación para gases como el NO_x, SO₂, CO y CO₂, y su comparación con normas internacionales, como los reportados en la Base de datos AP-42 de la EPA, permiten conocer las cantidades volumétricas que se expiden a la atmósfera. Esto es un indicativo para evaluar la eficiencia de la combustión del petróleo crudo nacional y las afectaciones provocadas por ellos al medio ambiente en estas zonas, en particular en la central termoeléctrica 10 de octubre de Nuevititas. Estudios realizados

por otros investigadores, demuestran que las determinaciones de las concentraciones de gases que afectan al medio ambiente emitidas por fuentes fijas se pueden obtener por el método anteriormente planteado obteniendo resultados satisfactorios. ^(27,28,39-41) Deben incluirse en el estudio los niveles de SO₂ y de material particulado, ⁽⁴²⁾ los cuales no fueron posible medir por no contar con el equipamiento requerido.

Dentro de las alternativas de solución para reducir los impactos de los gases contaminantes, en particular del CO₂ se encuentra el mejoramiento de la calidad de los combustibles, ⁽³⁴⁾ el uso de lavadores de gases, ⁽⁴³⁾ uso de membranas de separación de gases, ⁽⁴⁴⁾ entre otras.

Conclusiones

Los niveles de gases de combustión CO, CO₂ y NO medidos para las diferentes relaciones aditivo/agua se encuentran dentro de los niveles permisibles, tanto los que están regulados por normas cubanas como los que sus criterios de emisión están definidos por mediciones propias de la instalación. En el caso de CO₂, entre ambos CAR no existe coincidencia de este parámetro. Para el CO, en el CAR A existen mayores variabilidades de estos valores que en el CAR B, lo cual puede ser significativo de niveles de infiltraciones superiores en este equipo. En el CAR B presentan valores mayores de CO respecto al combustible puro para todas las combinaciones, por lo que coincide con las mismas del CAR A en los niveles obtenido en este. En el caso de O₂, la variabilidad en el porcentaje es mucho mayor en el CAR B que en el CAR A. Esto puede deberse a que existan mayores niveles de infiltraciones. De forma general, esta variable se mantiene en el intervalo de 0,25 -1,37 %. Estos resultados son de gran importancia para la central termo-eléctrica 10 de octubre ya que permite realizar estudios posteriores a otros niveles de dosificación, con vistas a incrementar la eficiencia de la combustión.

Contribuciones de los autores: "Conceptualización, YG, IB, LP y JC; metodología, YG, IB, LP and JC; software, FG, LP y DA.; validación, YG, IB, LP, JC, GM y DA; análisis formal, YG, IB, LP y JC; investigación, YG, IB, GM, LP, DA y JC; recursos, FG, LP, JC y DA; curación de datos, YG, IB, LP y GM; redacción: original preparación de borradores, YG y IB; Redacción: revisión y edición, YG y IB; supervisión, LP y JC; administración de proyectos, FG; adquisición de fondos, FG.

Financiamiento: Financiado por el Proyecto Nacional Determinación de propiedades dieléctricas de la mezcla de crudo cubano con PentoMuls 3C del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Cuba, gestionado y dirigido por la Universidad de Ciego de Ávila, Cuba.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos: A la central termoeléctrica 10 de octubre de Nuevitas, Cuba, por su apoyo para realizar los estudios experimentales a escala industrial. A la firma Pentol GmbH® por contar con sus especialistas, equipamientos de medición y permitir la evaluación de su aditivo PentoMuls 3C.

Referencias

1. Fowler D, Brimblecombe P, Burrows J, Heal MR, Grennfelt P, Stevenson DS, et al. A chronology of global air quality. *Philos Trans R Soc Math Phys Eng Sci* [Internet]. 30 de octubre de 2020 [citado 8 de noviembre de 2024];378(2183):20190314. Disponible en: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2019.0314>
2. Astra IM. Energi dan dampaknya terhadap lingkungan. *J Meteorol. Dan Geofis.* [Internet]. 15 de diciembre de 2010 [citado 11 de diciembre de 2024];11(2). Disponible en: <https://jmg.bmkg.go.id/jmg/index.php/jmg/article/view/72>
3. Ditia S. The effect of industrial waste on air pollution and water pollution causes climate change. *J Waste Sustain Consum* [Internet]. 29 de febrero de 2024 [citado 8 de noviembre de 2024];1(1):18-26. Disponible en: <https://journal-iasssf.com/index.php/JWSC/article/view/668>
4. Khaleel OJ, Basim Ismail F, Khalil Ibrahim T, Bin Abu Hassan SH. Energy and exergy analysis of the steam power plants: A comprehensive review on the Classification, Development, Improvements, and configurations. *Ain Shams Eng J* [Internet]. mayo de 2022 [citado 8 de noviembre de 2024];13(3):101640. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2090447921004160>
5. Kamil M, Ramadan KM, Awad OI, Ibrahim TK, Inayat A, Ma X. Environmental impacts of biodiesel production from waste spent coffee grounds and its implementation in a compression ignition engine. *Sci Total Environ* [Internet]. 20 de julio de 2019 [citado 11 de diciembre de 2024]; 675:13-30. Disponible en: <https://nchr.elsevierpure.com/en/publications/environmental-impacts-of-biodiesel-production-from-waste-spent-co>
6. Hernández-Garces A, Reinoso-Valladares M, Hernández-Bilbao F. Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros de la provincia de Holguín. *Min Geol* [Internet]. 2018;34(3):360-7. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223555432009>
7. OMM. Organización Meteorológica Mundial. 2024 [citado 12 de diciembre de 2024]. Las concentraciones de gases de efecto invernadero se disparan una vez más: nuevo récord en 2023. Disponible en: <https://wmo.int/es/news/media-centre/las-concentraciones-de-gases-de-efecto-invernadero-se-disparan-una-vez-mas-nuevo-record-en-2023>

8. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Real Decreto 1042/2017, de 22 de diciembre, sobre la limitación de las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de las instalaciones de combustión medianas y por el que se actualiza el anexo IV de la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. [Internet]. BOE-A-2017-15368. Sec. Anexo IV de la Ley 34/2007, Real Decreto 1042/2017 2017 p. 1-23. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2017/BOE-A-2017-15368-consolidado.pdf>
9. Ortiz AMD, Outhwaite CL, Dalin C, Newbold T. A review of the interactions between biodiversity, agriculture, climate change, and international trade: research and policy priorities. *One Earth* [Internet]. 22 de enero de 2021 [citado 11 de diciembre de 2024];4(1):88-101. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332220306540>
10. Rawat A, Kumar D, Khati BS. A review on climate change impacts, models, and its consequences on different sectors: a systematic approach. *J Water Clim Change* [Internet]. 1 de enero de 2024 [citado 8 de noviembre de 2024];15(1):104-26. Disponible en: <https://iwaponline.com/jwcc/article/15/1/104/98490/A-review-on-climate-change-impacts-models-and-its>
11. Kara T, Şahin AD. Implications of Climate Change on Wind Energy Potential. *Sustainability* [Internet]. 12 de octubre de 2023 [citado 8 de noviembre de 2024];15(20):14822. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/20/14822>
12. Deng Y, Ansart R, Baeyens J, Huili Z. Flue Gas Desulphurization in Circulating Fluidized Beds. *Energies* [Internet]. 2019 [citado 11 de diciembre de 2024];12(19):3908. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/20/3908>
13. Nordahl SL, Hanes RJ, Mayfield KK, Myers C, Sarah E Baker, Scown C. Carbon accounting for carbon dioxide removal. *One Earth* [Internet]. 2024 [citado 11 de diciembre de 2024];7(9):1494-500. Disponible en: <https://colab.ws/articles/10.1016%2Fj.oneear.2024.08.012>
14. Desideri U, Paolucci A. Performance modelling of a carbon dioxide removal system for power plants. *Energy Convers Manag* [Internet]. diciembre de 1999 [citado 11 de diciembre de 2024];40(18):1899-915. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890499000746>
15. Asif Z, Chen Z, Wang H, Zhu Y. Update on air pollution control strategies for coal-fired power plants. *Clean Technol Environ Policy* [Internet]. octubre de 2022 [citado 8 de noviembre de 2024];24(8):2329-47. Disponible en: <https://link.springer.com/10.1007/s10098-022-02328-8>

16. Nugraheni DT, Purwana R, Hamzah US. Environmental Impact Assessment of Co-firing Implementation at X Steam Power Plant, West Java. *J Presipitasi Media Komun Dan Pengemb Tek Lingkung* [Internet]. 30 de julio de 2023 [citado 8 de noviembre de 2024];20(2):334-44. Disponible en: <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/presipitasi/article/view/53237>
17. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (DAES). Informe de los objetivos de Desarrollo sostenible [Internet]. United Nations Publications, 300 East 42nd Street, New York, NY, 10017, United States of America: Naciones Unidas; 2023 [citado 11 de diciembre de 2024] p. 1-80. Report No.: 23-09739. Disponible en: https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*y2a5bv*_ga*NTQzMtk4MjI3LjE3MzM5NTkyMDQ.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTczMzk1OTQ3My4xLjEuMTczMzk2MDM1Ny4wLjAuMA..
18. Prelec Z, Mrakovčić T, Dragičević V. Performance study of fuel oil additives in real power plant operating conditions. *Fuel Process Technol* [Internet]. 1 de junio de 2013 [citado 11 de diciembre de 2024]; 110:176-83. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382012004572>
19. Ali Ijaz Malik M, Kalam MA, Mujtaba Abbas M, Susan Silitonga A, Ikram A. Recent advancements, applications, and technical challenges in fuel additives-assisted engine operations. *Energy Convers Manag*. [Internet]. agosto de 2024 [citado 8 de noviembre de 2024]; 313:118643. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890424005843>
20. Al-Khafaji Z, Abbas R. Using special additives for decreasing the viscosity of Missan crude oil. En: *AIP Conference Proceedings* [Internet]. 2023. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/372388861_Using_special_additives_for_decreasing_the_viscosity_of_Missan_crude_oil
21. Gharbi K, Benyounes K, Khodja M. Removal and prevention of asphaltene deposition during oil production: A literature review. *J Pet Sci Eng*. 1 de septiembre de 2017;158.
22. Askari M, Aliofkhazraei M, Jafari R, Hamghalam P, Hajizadeh A. Downhole corrosion inhibitors for oil and gas production -a review. *Av En Cienc E Ing* [Internet]. 1 de diciembre de 2021; 6:100128. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/352815709_Downhole_corrosion_inhibitors_for_oil_and_gas_production_-a_review

23. Salthammer T. Carbon monoxide as an indicator of indoor air quality. *Environ Sci. Atmospheres* [Internet]. 2024 [citado 8 de noviembre de 2024];4(3):291-305. Disponible en: <https://xlink.rsc.org/?DOI=D4EA00006D>
24. Lawin H, Ayi-Fanou L, Hinson A, Kagima J, Ukwaja K, Gordon S, et al. Exhaled carbon monoxide: a non-invasive biomarker of short-term exposure to outdoor air pollution. *BMC Public Health*. 17 de abril de 2017; 17:320.
25. Yang CH, Chen PH, Wu CH, Yang CS, Chuang LY. Deep learning-based air pollution analysis on carbon monoxide in Taiwan. *Ecol. Inform.* [Internet]. 1 de mayo de 2024 [citado 11 de diciembre de 2024]; 80:102477. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574954124000190>
26. Fonte A, Cuesta O, Sosa C. Estimación de emisiones contaminantes atmosféricas en la provincia de Camagüey desde fuentes fijas. *Rev Cuba Meteorol* [Internet]. 1 de enero de 2017 [citado 12 de diciembre de 2024];23(1):57-77. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/229>
27. Hernández-Garces A, Peña-Cossío R, Bilbao FH, González JA. Distribución espacial de la emisión de contaminantes a la atmósfera emitidos por centrales azucareros villaclareños. 2021;48(3). Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v48n3/2223-4861-caz-48-03-29.pdf>
28. Marrero-Díaz Y, Cruz-Estopiñan EB, Suárez-Benítez M. Emisiones atmosféricas provenientes de centrales azucareros de Holguín, Cuba: Una herramienta de gestión pública local. *Rev. Cuba Meteorología* [Internet]. junio de 2020 [citado 12 de diciembre de 2024];26(2). Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/7019/701977549006/html/>
29. Meneses-Ruiz E, Roig-Rassi A, Paz E, Alonso D, Alvarado J. Factores de emisión de CO, CO₂, NO_x y SO₂ para instalaciones generadoras de electricidad en Cuba. *Rev. Cuba Meteorología* [Internet]. 29 de enero de 2018 [citado 12 de diciembre de 2024];24(1):1-9. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/255>
30. Rojas EM. Revisión Norma de Emisión para Centrales Termoeléctricas [Internet]. Ministerio del Medio Ambiente; 2023. Disponible en: https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2023/proyectos/e78_Presentacion.pdf
31. Valdés DR, Pérez LLE, Santos DOC, Aranda AC, Díaz AS, Caraballo IVN. Inventario de emisiones de contaminantes en las fuentes fijas de las zonas urbanas de Pinar del Río y Santa Lucía. *Rev. Cuba Meteorología* [Internet]. 2013;19(1):68-8emisión de CO. Disponible en: <http://www.insmet.cu/contenidos/biblioteca/revistas/2013/n1/6.pdf>

32. Liu C, Yin P, Chen R, Meng X, Wang L, Niu Y, et al. Ambient carbon monoxide and cardiovascular mortality: a nationwide time-series analysis in 272 cities in China. *Lancet Planet Health*. 1 de enero de 2018; 2: e12-8.
33. NC 1020: 2014. Calidad del aire — contaminantes concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables ICS: 13.040. 2014.
34. Rodríguez Arias AD, Rosabal Ponce LB. Aspectos esenciales para lograr el uso eficiente del combustible nacional, en las centrales termoeléctricas cubanas. *Univ. Soc.* [Internet]. 11 de julio de 2023 [citado 1 de noviembre de 2023];15(4):65-75. Disponible en: <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/3953>
35. Tian X, An C, Nik Bakht M, Chen Z. Assessment of reductions in NO₂ emissions from thermal power plants in Canada based on the analysis of policy, inventory, and satellite data. *J Clean Prod*. 1 de febrero de 2022; 341:130859.
36. Tang Y, Li Z, Fu Y, Zhao M. Causal Effects of PM_{2.5}, NO_x, and NO₂ on Cognitive Function: A Two-sample Mendelian Randomization Study. *Aerosol Air Qual Res* [Internet]. 2024 [citado 11 de diciembre de 2024];24(8):230326. Disponible en: <https://aaqr.org/articles/aaqr-23-12-0a-0326>
37. NC 803:2017. Calidad del aire — emisiones máximas admisibles de contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor. ICS: 13.040. 2017.
38. Meneses-Ruiz E, Roig-Rassi A, Paz E, Alonso D, Alvarado J. Factores de emisión de CO, CO₂, NO_x y SO₂ para instalaciones generadoras de electricidad en Cuba. *Rev. Cuba Meteorología* [Internet]. 29 de enero de 2018 [citado 11 de diciembre de 2024];24(1):1-9. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/255>
39. Núñez-Caraballo V, Saura-González G, Rodríguez-Rojas R, Otero-Martín M, Oca AMM de, Purón-Arbolaez M, et al. Inventario de emisiones de fuentes fijas y móviles, municipio Ranchuelo, provincia Villa Clara, Cuba. *Rev. Cuba Meteorología* [Internet]. 24 de noviembre de 2018 [citado 12 de diciembre de 2024]; 24:356-64. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/441>
40. Peña-Ojeda JN, Carracedo-Velázquez A. Estimación de las emisiones provenientes de fuentes fijas en la ciudad Las Tunas. *Rev. Cuba Meteorología* [Internet]. 24 de noviembre de 2018 [citado 11 de diciembre de 2024]; 24:374-84. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/443>

41. Portal-Castillo D. Análisis de las emisiones provenientes de la Refinería Sergio Soto y su influencia en la calidad del aire en el municipio Cabaiguán. Rev. Cuba Meteorología [Internet]. 2018; 24:412-8. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/server/api/core/bitstreams/785ad26d-4557-4148-8e56-ec3d802f6ceb/content>
42. Álvarez Cruz A, Morales Pérez MC, González Rivero RA, Núñez Caraballo V. Cuantificación del dióxido de azufre en aire ambiental en zona de protección sanitaria de una recapadora de neumáticos. Cent Azúcar [Internet]. diciembre de 2022 [citado 11 de diciembre de 2024];49(4):69-79. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2223-48612022000400069&lng=es&nrm=iso&tlng=es
43. Cassula D.A, Zanzini JC, dos Santos Lino J, Luz da Silva T, dos Santos Z. Estudo de caso sobre a eficiência energética de fontes renováveis no brasil: avaliação da utilização da biomassa da cana-de-açúcar na cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro. En Porto Alegre. Brasil: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais- IBEAS; 2015. p. 1-9. Disponible en: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2015/X-009.pdf>
44. Yagmur Goren A, Erdemir D, Dincer I. Comprehensive review and assessment of carbon capturing methods and technologies: Environmental research. Environ. Res. [Internet]. 1 de enero de 2024 [citado 11 de diciembre de 2024]; 240:117503. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935123023071>

/ **Recibido:** 10 octubre 2024 / **Aceptado:** 12 noviembre 2024 / **Publicado:** 15 diciembre 2024 /

Cita: González-Díaz, Y., Benítez, I., García, F., Márquez, G., Prieto, L., Carracedo, J., Aldama, D., Galindo, P. Efecto del aditivo pentomuls 3c en la composición de los gases de combustión del petróleo crudo cubano. Revis Bionatura 2024; Vol 9. No. 4.

Peer review information: Bionatura thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work using <https://reviewerlocator.webofscience.com/>

All articles published by Bionatura Journal are freely and permanently accessible online immediately after publication, without subscription charges or registration barriers.

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)